

광릉 소유역의 수문 관측을 위한 전기비저항탐사 - 예비결과

최인혁¹ · 문상기² · 우남철¹ · 김준^{2,3}

¹연세대학교 지구시스템과학과

²연세대학교 지구환경연구소

³연세대학교 대기과학과

(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

Electrical Resistivity Survey for Hydrologic Monitoring in the Gwangneung Experimental Forest - Preliminary Results

In-Hyuk Choi¹, Sang-Ki Moon², Nam-Chil Woo¹, Joon Kim^{2,3}

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

²Global Environment Laboratory, Yonsei University, Seoul, Korea

³Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Received January 24, 2005; Accepted March 29, 2005)

ABSTRACT

Groundwater plays an important role in water and carbon cycles in Gwangneung forest watershed located in a complex landscape. Because groundwater affects electrical resistivity (ER) of underground materials, the depth to water table and water content in subsurface can be investigated through measuring ER. Accordingly, the ER survey has been employed more frequently in recent hydrological investigations. Quantitative applications of the results of ER survey will contribute significantly to the examination of water budget closure at various spatiotemporal scales. This paper presents the preliminary results of the ER survey conducted at Gwangneung forest watershed to determine proper locations and depths of monitoring wells. Such use of ER survey, in conjunction with an integrated geophysical investigation and geographic information system, can provide more effective examination of underground structure and optimal locations of monitoring wells to further our understanding of the role of groundwater.

Key words : Groundwater, Gwangneung forest, Watershed, Electrical resistivity, Monitoring well

I. 서 론

현재 광릉 KoFlux 슈퍼사이트에서는 소유역을 중심으로 한 물 순환과 수지에 관한 학제 간 협력 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지의 물 순환과 관련된 연구경향을 살펴보면 지하수 흐름과 증발산을 평가할 때 실험식이나 경험식을 적용함에 따라 정량적인 평가에 문제점이 제기되어 왔다(Park, 1996). 현재 광릉 시험림에서 진행되는 수문 수지에 대한 총체적인 양적

평가는 비록 소유역 단위이나 강수, 증발산, 지표 유출, 토양 수분, 지하 침투 및 지하수 함양률 등 거의 모든 수문학적 요소들이 현장에서 실측된다. 이러한 현장에서의 집중 관측과 다중 규모 연계 연구를 통해 한강 및 우리나라 전체 유역에 적용할 방법론의 기초를 제공하는 연구이기에 의의가 크다. 본 연구에서는 소유역의 물 수지가 과연 닫히는지를 확인하기 위한 실측 자료를 제공할 지하수 관측정(monitored well) 위치 선정을 위해 사용된 물리탐사 기법의 하나

인 전기비저항 탐사 기법을 소개한다.

지하수는 지하 매질의 전기적 성질인 전기비저항에 매우 큰 영향을 미치기 때문에, 지하매질의 전기적인 물성 차이에 의한 반응을 측정하고 이로부터 지하구조를 영상화하는 전기비저항 탐사는 과거부터 지하수 탐사에 많이 사용되어왔다(Chung et al., 1992; Kim et al., 1999; Song et al., 2000; Suh et al., 2000). 특히 우리나라 지하수 부존의 특징은 충적층보다는 기반암의 파쇄대나 절리를 따라 흐르는 암반 대수층이 우세하기 때문에 임의의 지점에 계획 없이 시추하기보다는 전기비저항 탐사와 같은 비파괴 물리탐사를 통해 지하수 부존 가능성이 높은 지역을 선정하여 관정을 설치하는 것이 보다 효과적이고 경제적이다(Porsani et al., 2004). 또한, 물 수지 분석을 위한 수리지질학적 수치모델의 구축에 있어 기반암 심도 및 대수층의 구조 등이 가능한 한 정량적으로 제시되어야 하므로 복합 물리탐사를 통해 대상 지역 전반에 걸쳐 자료를 획득하는 것이 중요하다(Song et al., 2000).

전기비저항은 지반을 구성하는 물질의 공극률, 포화도(saturation ratio), 간극수의 전기비저항, 점토함유량 뿐만 아니라 입도조성, 성분 및 온도 등에 의하여서도 복합적인 영향을 받기 때문에 이를 이용한 탐사 결과를 정량적으로 적용하는데 한계가 있다(Park, 2004). 그러나 최근에는 전기비저항을 이용하여 암반 등급을 분류하고 토양의 염도, 유기물 함량, 수분함량, 소성(plasticity), 단위 중량(unit weight)까지도 추정하고자 하는 정량적 적용에의 시도가 이루어지고 있으며(Giao et al., 2003), 복합 물리탐사를 통해 토양 수분 함량을 평가하는 연구(Garambois et al., 2002; Jackson et al., 2002; Lunt et al., 2004), 지하수 함양률 및 수위 변동을 측정하는 연구(Cook et al., 1992; Kim, 1997; Berthold et al., 2004; Chand et al., 2004; Park et al., 2004; Park et al., 2005), 중력탐사를 통해 대수층 저류변화와 비산출률을 측정하는 연구(Pool and Eychaner, 1995) 등이 진행되는 추세인데 향후 지속적인 연구를 통해 기술을 발전시킨다면 수문 순환 연구에 적용성이 높아질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 물 순환의 한 부분을 차지하는 지하수의 흐름과 변화를 관측하기 위해 도폭(map) 분석과 현장조사를 통하여 지하수 관측공 설치 후보지를 선정하고, 보다 효과적인 관측정의 위치를 설정하기 위해 후보지를 대상으로 전기비저항 탐사를 실시하여 그 결

과로부터 관측공의 적정 위치와 심도를 결정하는 과정에 대해 논의하고자 한다.

II. 이론적 배경

지하구조를 구성하는 물질들은 전기적인 물성을 가지고 있기 때문에 여기에 인위적인 전류를 흘려보내면 이에 의해 전위차가 형성된다. 이를 측정함으로써 지하의 전기비저항 분포를 결정하고 지하구조를 정성적으로 해석할 수 있다. 지하의 전기비저항(ρ)은 암석의 종류와 체적함수율(공극률* 포화도), 지하수, 점토광물의 함유량, 온도 등의 복합적인 결과로 나타난다(Sohn et al., 1999). 이것은 저항(R), 단면적(A), 저항기의 길이(l)의 함수로서 다음과 같이 표현되며 단위는 $\Omega\cdot m$ (ohm-meter)이다.

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (1)$$

균질, 등방 매질에서 한 쌍의 전류전극 및 전위전극에 의한 전위분포를 나타내면 Fig. 1과 같다.

전류전극 C에서는 전류를 흘려보내고, 전위전극 P₁에서는 전위를 측정한다. 균질, 등방성 매질이므로 전기비저항 ρ 는 어디에서나 균일하고 전류는 방사상으로 동일하게 흐르게 되며 전위 역시 같은 거리에서 동일한 등전위면을 이루게 된다. 두께가 dr인 매우 얇은 두께의 매질을 통과하는 미소 전위 dV는 전류가 i일 때 옴(Ohm)의 법칙에 의하여

$$dV = iR \quad (2)$$

이 되고, 여기에 (1)을 대입하면

$$dV = i \left(\rho \frac{l}{A} \right) = i \left(\rho \frac{dr}{2\pi r^2} \right) \quad (3)$$

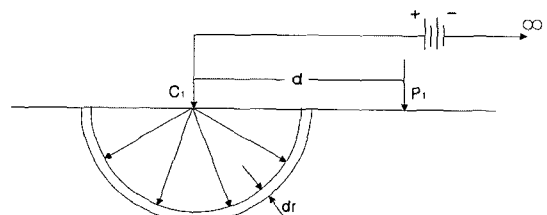


Fig. 1. Calculation of electric potential at P₁, using a pair of current(C) and potential(P) electrodes. This figure was modified from Sohn et al.(1999).

이 된다. 여기서 단면적 A는 반구의 표면적이므로 $2\pi r^2$ 이다.

한 점에서의 전위는 무한히 떨어진 지점에서의 전위 (통상 0)와 비교하므로 P_1 에서의 전위는 C_1 에서 P_1 까지의 거리 d 로부터 무한대까지 적분을 하여 (4)와 같이 유도된다.

$$V = \int_d^\infty dV = \frac{i\rho}{2\pi} \int_d^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{i\rho}{2\pi d} \quad (4)$$

(4)는 전기탐사의 가장 기본이 되는 식이다.

각각 두 쌍의 전류전극과 전위전극을 사용하게 되면 (Fig 2), 각 전위전극에서의 전위를 먼저 구한 다음, 두 지점 사이의 전위차(ΔV)를 구하며 식은 (5)와 같다.

$$\Delta V = V_{P_1} - V_{P_2} = \left(\frac{i\rho}{2\pi d_1} - \frac{i\rho}{2\pi d_2} \right) - \left(\frac{i\rho}{2\pi d_3} - \frac{i\rho}{2\pi d_4} \right) \quad (5)$$

$$= \frac{i\rho}{2\pi d_1} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4} \right)$$

(5)를 ρ 에 대한 식으로 정리하면,

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{i} \left[\frac{1}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4}} \right] \quad (6)$$

이 되며, []항을 거리계수(geometric factor) G로 바꾸어 정리하면 다음과 같다.

$$\rho = 2\pi G \cdot \frac{\Delta V}{i} \quad (7)$$

현장에서는 상황과 목적에 맞게 G를 조정하고 $\Delta V/i$ 를 측정하여 ρ 의 분포를 얻는다. 그러나 균질 및 등방 매질을 가정한 식이므로 불균질 매질인 자연상태에

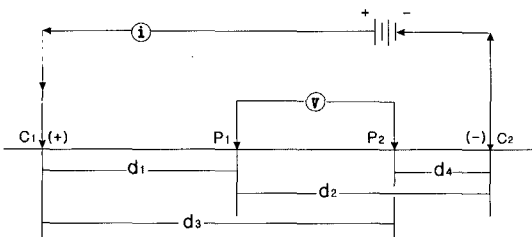


Fig. 2. Calculation of ΔV between P_1 and P_2 , using two pairs of current and potential electrodes. This figure was modified from Sohn *et al.*(1999).

적절한 보정작업이 선행되어야 한다.

본 연구에서 적용한 배열은 쌍극자-쌍극자 배열(dipole-dipole array)로서 전류전극(C_1 - C_2), 전위전극(P_1 - P_2) 간격을 a 로 일정하게 고정시키고 전류전극과 전위전극 사이의 거리를 a 의 정수배(na)씩 증가시키는 배열법이다(Fig. 3). 이 방법은 분해능이 뛰어나고 신속한 수직, 수평탐사로 지하의 2차원적 비저항 정보를 얻을 수 있는 장점이 있어서 우리나라에서는 지하수탐사나 지반조사를 위해 가장 많이 사용한다(KSEG, 2002). 하지만 서론에서 언급한 바와 같이 전기비저항 결과의 정량적 적용이 어렵기 때문에 다른 탐사와 병행해야한다. 쌍극자 배열법의 탐사가능심도는 통상 전극간격 a 의 5배이다(KSEG, 2002).

III. 연구지역

연구지역은 경기도 포천군 소흘읍 소재 광릉시험림 내의 소유역으로서 37°45'N, 127°10'E에 위치하고 있다. 면적은 약 2km²이며 봉선사 유역(약 10km²)의 일부분으로서 하천 치수의 증가에 따라 퇴적된 수위표 유역(약 201km²)과 한강 서울 유역(약 1,537km²)에 속하고, 최종적으로 약 26,000km²의 면적을 갖는 한강 대유역의 한 부분을 이룬다. 전형적인 산악지형으로서 지질 매체는 얇은 토층과 풍화대 및 암반으로 구성되어 있다. 기반암은 경기편마암복합체로서 편암(schist)과 편마암(gneiss)으로 구성되어 있다. 토양은 이 기반암이 풍화되어 형성된 것으로서 모암 상부까지의 토양단면에 해당하는 A, B, C 층들이 모두 잘 발달된 산성토양이고 유기물이 풍부한 갈색산림토양을 이루고 있다(KNA, 2004).

IV. 측정 및 자료 처리

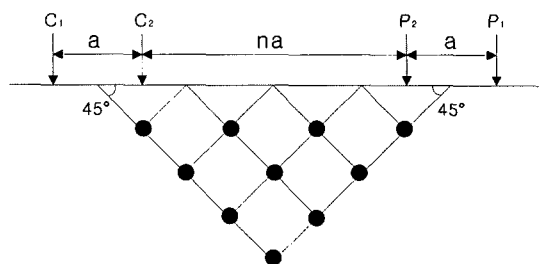


Fig. 3. Dipole-dipole array. This figure was modified from Sohn *et al.*(1999).

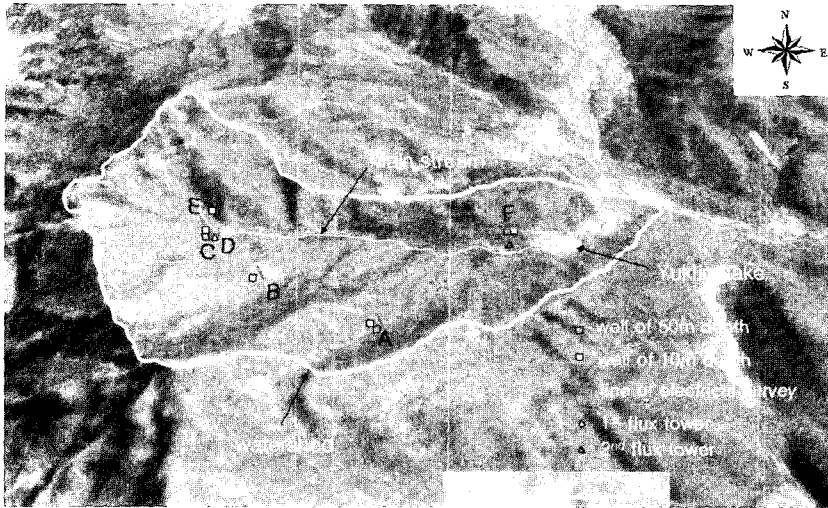


Fig. 4. Gwangneung Experimental Forest and electrical resistivity survey lines. The marks for wells of 10m and 50m depths represent wells to be installed from this study.

본 연구에서 수행한 전기비저항 지표탐사법에 이용된 장비는 미국 Advanced Geoscience사의 Sting R1이다. 도폭분석과 현장조사를 통해 선정된 6곳의 관측점 설치 후보지역에서(Fig. 4) 현장의 지형적 여건에 맞추어 전극간 간격(a)과 전극전개수(n), 축선길이(l) 등을 다양하게 설정하였고(Table 1), 전류는 10~20mA로 하여 2004년 10월 18일부터 19일까지 2일간 측정을 실시하였다.

측정 자료의 품질관리를 위해서 탐사기의 전압이 최소 11 volt 이상이 되도록 유지했고, 한 점의 자료를 얻기 위해서 10회 반복 측정하였으며, 그 값들의 표준편차(σ)가 1이하일 때 자료를 획득했다. 이상치가 나올 때에는 접지전극을 확인하고, 부하하는 전류를 높이는 등의 현장 응급조치를 취하였고, 적어도 σ 값이

10을 넘지 않도록 노력하였다. 그럼에도 불구하고 σ 값이 과도하게 나온 자료나 음의 값은 null값으로 처리하였다.

현장에서 획득한 자료는 전기탐사자료를 역산처리하는 프로그램인 DIPRO for Windows V.4.0(Hee Song Geotek Co., 2004)를 사용하였다. 현장조사 시, 수평방향을 축선 전개방향으로 선정하여 고도에는 거의 변화가 없었기 때문에 지형보정은 고려하지 않았다. 역산은 유한요소법(FEM)으로 실시하였고, 알고리즘은 2차 미분 평활화 제한법을 사용하였으며, 10회 반복 계산하여 RMS 오차를 줄이려고 하였다. 평활화 제한의 정도와 오차의 감소 간의 균형을 잡는 변수인 라그랑지 곱수(lagrangian multiplier)는 ACBM(Active Constraint Balancing Method)을 사용하였는데 이것은 역산이 수행되는 블록별로 각각의 분해능에 따라 라그랑지 수가 공간적으로 변화하는 것으로서 기존에 일률적으로 전 측정지역에 동일한 상수로 적용하였던 방식보다 분해능을 높일 수 있는 장점이 있다.

Table 1. Specifications of resistivity survey lines.

line	electrode spacing(a) (meter)	number of electrode (n)
A	1	22
	2	10
	4	4
B	1	8
	4	8
C	2	4
D	1	8
E	4	6
F	4	6

V. 결과 및 고찰

전기비저항 탐사를 통해 생산되어지는 도면은 그 자체가 지하구조를 말하는 것이 아니라 지하 매질이 전기적으로 반응한 것을 표현한 것이다. 더구나 현재까지의 기술로는 전기비저항 탐사의 결과를 앞서 언급한

Table 2. Resistivities of materials (Ward, 1990).

Material	Resistivity(Ω -m)
wet to moist clayey soil & wet clay	1-10
wet to moist silty soil & silty clay	under 10
wet to moist silty & sandy soils	10-100
sand & gravel with layers of silt	under 1000
coarse dry sand & gravel deposits	beyond 1000
well-fractured to slightly fractured rock with moist-soil-filled cracks	100
slightly fractured rock with dry soil-filled cracks	under 1000
massively bedded rock	beyond 1000

바와 같이 정량적으로 적용하는데 한계가 있어 보다 정확한 구조와 구성물질에 대한 정보를 알려면 복합적인 탐사가 수행되어야 한다. 그럼에도 불구하고 전기비저항 탐사를 통해 Table 2와 같은 개략적인 구성물질 및 지하구조에 관한 정보를 추론할 수 있다.

전기비저항 역해석을 통하여 획득한 각 지점의 2차원 전기비저항 단면을 비교해보면 우선 측선 A, C, F 지역이 다른 지역들에 비해 상대적으로 전기비저항이 낮음을 알 수 있다. 각 지점별로 분석한 결과는 다음과 같다.

A 측선 : 먼저 A 측선 지역은 계곡으로서 다른 지역에 비해 현저히 유기물층(O층)이 두껍고, 전극이 쉽게 박힐 정도로 지표부근 토양이 연약하였으며, 관측 시간이 정오였음에도 불구하고 습기가 많고, 또한 측선의 우측 북쪽 3미터 떨어진 곳에 강우시 흐를 것

로 추정되는 작은 지류의 흔적이 있었다(Fig. 5). A 측선의 전기비저항이 전반적으로 낮게 나타난 것은 이러한 지역적 특징에 기인한 것으로 사료된다. 1m 간격으로 측정된 자료는 σ 값이 크거나 음의 값이 많아 해석에서 제외시키고 2m, 4m 간격으로 측정된 자료만 사용하였다. 전기비저항은 전반적으로 400 Ω -m 정도로 낮은 특징을 보이고, 지표부근에서는 700 Ω -m 정도를 나타내며, 심도가 깊어질수록 낮아지는 양상을 띤다. 20m 심도까지도 값이 400 Ω -m에 불과한 것으로 보아 기반암 심도가 그보다는 깊을 것으로 추정되며, 주변 환경의 특징을 고려할 때 지하수면까지의 깊이가 그다지 깊지 않을 것으로 사료된다.

B 측선 : 측선 B 지역은 지표에서도 전석이 많이 분포됨을 확인할 수 있는 곳으로서, 전극간격 1m의 그림(Fig. 6-A)에서도 이러한 현상이 잘 반영되고 있

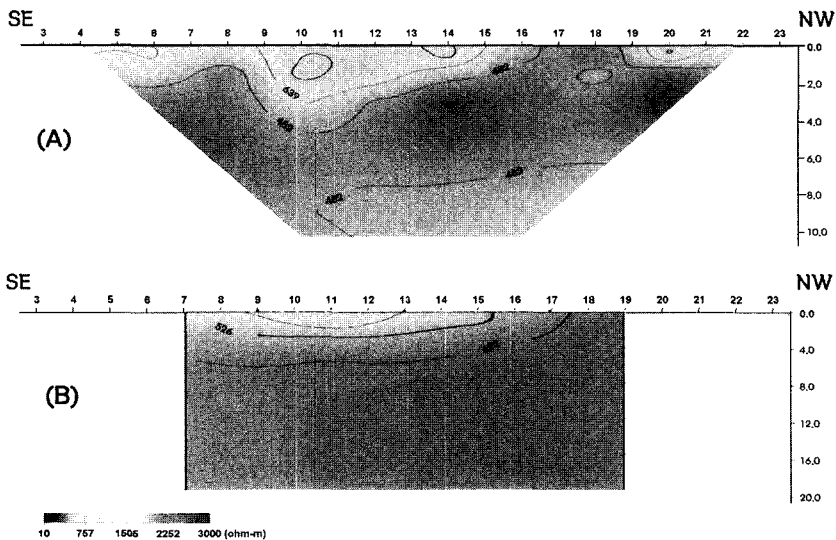


Fig. 5. Electrical resistivity sections for the line A with different electrode spacings. (a) a=2m, (b) a=4m. Vertical exaggeration varies on the sections of (A) and (B).

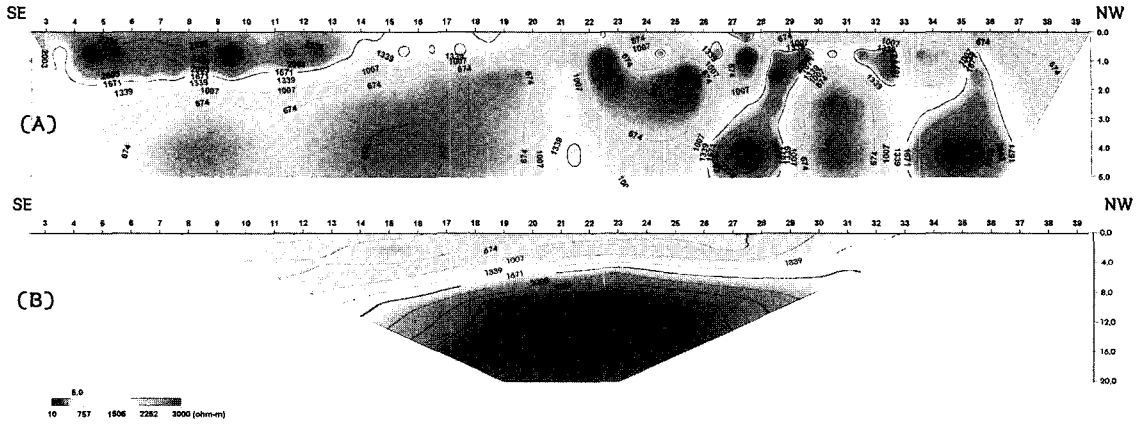


Fig. 6. Electrical resistivity sections for the line B with different electrode spacings. (a) a=1m, (b) a=4m. Vertical exaggeration varies on the sections of (A) and (B).

다. 축선의 좌측, 남쪽의 지표 부근에서 나타나는 2000~4000Ω·m의 고비저항대, 우측 북쪽의 4~6m 심도에서 나타나는 3000Ω·m의 고비저항대가 이러한 전석의 영향으로 추정된다. 한편, 곳곳에 60~400Ω·m 정도의 저비저항대가 나타나는데, 특히 전극번호 22~28, 심도 1~3m에 보이는 저비저항대는 pipe flow 같은 비포화대 내에서의 물의 흐름으로 사료된다. 이렇게 추정하는 이유는 본 축선의 수직방향 5m 후방에 위치한 절단된 사면에서 물이 흘러나오는 것을 탐사 당시 관측하였기 때문이다. 4m 간격의 그림(Fig. 6-B)은 1m 간격 그림과 같은 자세한 정보는 주지 못하는데 그것은 전극간격-분해능의 문제인 것으로 사료된다. 반면, 20m 심도까지 탐사한 결과 6m 부근에서 현저히 비저항치가 높아지는 사실을 발견할 수 있는데 크기가 상당히 높고 비저항치가 매우 높은 것으로 보아 기반암일 가능성이 있다. 종합적으로 볼 때 이 지역에서는 전극번호 14~19의 지점에 관측공을 설치하는 것이 효과적일 것으로 사료된다.

C 축선 : 축선 C는 소유역 상단부에 위치한 플렉스 타워의 서측방향으로 5m 떨어진 곳으로서 육림호로 흘러들어가는 두 하천의 가운데에 위치한다(Fig. 7). 1~2m 심도에 전석으로 추정되는 3000Ω·m 정도의 고비저항대가 보이며 5m 심도부터 300Ω·m 정도의 저비저항대가 다소 두껍게 나타남을 알 수 있다. 기반암으로 추정할 수 있는 고비저항대는 10m 심도까지는 나타나지 않으며, 지하수면은 주변 지형과 전기비저항 단면도로 보아 그다지 낮지 않은 곳에 위치할 것으로 사료된다.

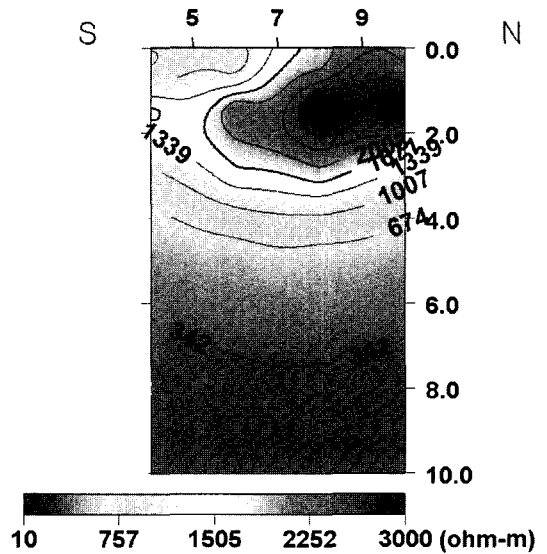


Fig. 7. Electrical resistivity section for the line C.

D 축선 : 축선 D는 1st Flux Tower의 북동쪽 방향 5m 떨어진 곳으로서 도로상이고, 바로 옆에 산림과학원에서 설치한 유량측정용 댐(weir)이 있으며, 2~3년 전에 폭우로 인해 토양유실이 많았던 곳이다. 그런데 D 축선의 자료는 A 축선 1m 간격의 자료와 마찬가지로 깊이가 크거나 음의 값이 많아 품질이 좋지 않으므로 이번 예비결과에서는 포함시키지 않았다.

E 축선 : 축선 E 지역은 주 하천에 합류하는 작은 지류의 동측사면으로서 그 사면 지하의 물 흐름이 지류를 향해 어떤 양상으로 이동하는가를 파악하고자 선정된 지역이다. 경사가 심하여 하천까지의 수직 깊이

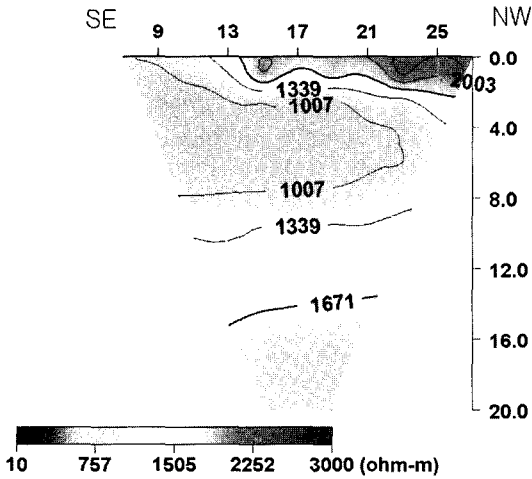


Fig. 8. Electrical resistivity section for the line E.

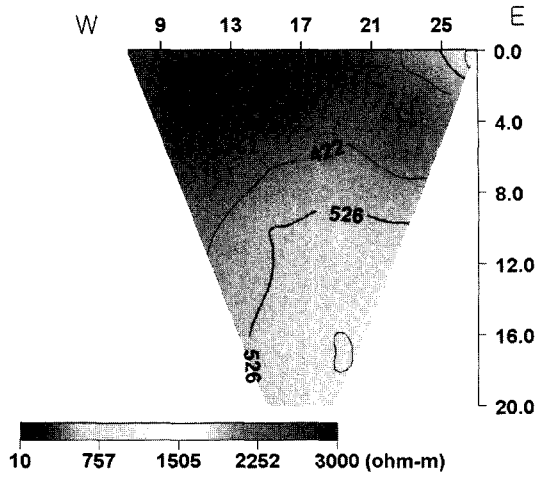


Fig. 9. Electrical resistivity section for the line F.

가 깊지만 하천변이기 때문에 낮은 비저항대가 탐사될 것으로 예상하고, 전극간격 4m로 측정하여 20m 심도까지 조사하였다. 자료 처리 결과, 심도 2m까지 2000Ω·m대의 고비저항대, 10m까지 800Ω·m대의 저비저항대, 그 하부로 다시 1800Ω·m 이상의 고비저항대가 교호하는 것으로 나타났다(Fig. 8). 중간에 위치한 저비저항대는 지하수가 흐른다고 보기에는 비교적 높은 값이고, 그 이하 20m 심도까지도 높은 비저항대가 산출되었기 때문에 지하수 관측공은 20m 이상 깊이로 시추해야 할 것으로 판단된다.

F 측선 : 측선 F 지역은 유역 하부에 위치한 육림호 인근으로서 하천의 하류 지역이면서 동시에 하천 동측 사면의 경사가 갑자기 완만해지는 곳이므로 퇴적물이 두껍게 쌓일 수 있는 퇴적환경을 가졌다. F 측선의 전기비저항이 다른 지역에 비해 전반적으로 낮은 것은 이러한 지형적 특성 때문인 것으로 추정된다(Fig. 9). 전기비저항은 200~500Ω·m의 낮은 비저항대를 보이고 있으며, 기반암은 20m보다 더 하부에 위치하고 있는 것으로 추정된다. 지하수공은 좌측인 서쪽방향에 설치하는 것이 상대적으로 효과적일 것으로 판단된다.

한편, 본 전기비저항 탐사에서 전극간격 1m 측선의 측정 시, 음의 비저항값들이 따를 이루며 발생한 뒤, 그 하부에 비정상적인 고비저항을 보이는 경우가 있었는데 이것은 다수의 현장 탐사자들이 경험하는 것으로서 본 연구에서는 음의 비저항값들을 'null' 값으로 처리하였다. Chung and Chung(1999)은 이것이 자연 전위 현상이나 잡음이 아닌, S자형 습곡/단층 형태로

발달된 도전성 탄맥, 하상에서 모래와 진흙층이 교호하는 형태로 발달한 퇴적구간, 사행 발달에 의한 반달형 잔존 도전성 진흙 퇴적층, 전력선 전봇대나 송전탑의 인위적 접지구간, 또는 전력선이 전혀 존재하지 않는 탐사지역 등을 비롯한 기타 자연 상태에서도 나타날 수 있는 지하의 또 다른 정보라는 사실을 밝혔다. 본 연구에서 나타난 음의 비저항값이 이러한 원인 때문인지 또는 측정 오류 때문인지에 대한 보다 자세한 연구가 필요하며, 정상적인 측정에서의 음의 비저항값에 대한 원인이 규명될 시에는 보다 정확한 지하구조의 정보를 얻을 수 있다.

VI. 요약 및 결론

광릉 슈퍼사이트 소유역의 물 수지의 단합을 확인하기 위해 지하수 관측공 설치하고자 전기비저항 탐사를 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유역의 중부, 남측 경계부의 측선 A 지역과 유역 중부, 주 하천변의 측선인 C 지역, 유역 하부의 측선 F 지역은 전기비저항이 심도 10~20m까지도 200~500Ω·m에 불과하여 유역 내에서 전기비저항이 상대적으로 낮은 지역이다. 이는 그 지역의 지형적 특성과 퇴적환경에 기인한 것으로 사료된다.

2. 측선 A 지역은 유기물층이 두껍고 습기가 많은 계곡부로서 전반적으로 깊은 심도까지 낮은 비저항을 보이고, 기반암은 20m보다 하부에 있을 것으로 사료된다.

3. 측선 B 지역은 전석이 많은 곳으로서 5m 심도까지는 전석으로 추정되는 고비저항대가 곳곳에 나타나고, 파이프로류로 추정되는 60~400 Ω -m의 저비저항대가 관측된다. 심도 6m 부근에서 현저히 높은 비저항대가 나타나는데 분포와 크기로 보아 기반암일 것으로 사료된다.

4. 측선 C 지역은 상단부 플릭스 타워의 서쪽 5m 떨어진, 육림호로 들어가는 하천과 그 지류의 가운데에 위치하여 심도 10m까지 비저항값이 300 Ω -m에 불과하며 지하수면은 주변 지형과 전기비저항 단면도를 고려할 때 낮지 않은 곳에 위치할 것으로 사료된다.

5. 측선 E 지역은 주 하천에 합류하는 작은 지류의 동측사면으로서 심도 2m까지 2000 Ω -m대 고비저항대, 10m까지 800 Ω -m대의 저비저항대, 다시 그 하부로 1800 Ω -m이상의 고비저항대가 교호한다. 지하수 관측공은 20m이상 깊이로 시추해야 할 것으로 추정된다.

6. 측선 F 지역은 육림호 인근, 하천의 하류지역이면서 동시에 하천 측면의 경사가 갑자기 완만해지는 곳으로서 심도 20m까지도 전반적으로 200~500 Ω -m에 불과한 낮은 전기비저항을 보인다. 이는 퇴적물이 두 겹겹 쌓일 수 있는 지형특성에 기인한 것으로 사료되며 기반암은 20m보다 더 하부에 위치할 것으로 추정되고 관측공은 좌측 서쪽 방향에 설치하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

7. 전극간격 1m로 탐사할 시, 띠를 이루는 음의 비저항값이 측정되었는데 이에 대한 원인이 규명되면 보다 자세한 지하구조의 정보를 얻을 수 있다.

VII. 적 요

지하수는 복잡 경관에 위치한 광릉 산림 소유역의 물과 탄소 순환에 중요한 역할을 담당한다. 지하수가 지하 매질의 전기비저항(ER)에 크게 영향을 미치기 때문에, ER을 사용하여 지하수의 깊이와 지하 수분 함량을 조사할 수 있다. 따라서 최근 전기비저항 탐사를 통해 토양수분과 지하수 함양률, 수위변동을 측정하는 연구가 진행되고 있다. 정량적으로 적용할 수 있는 연구 결과가 나온다면 전기비저항 탐사가 다양한 시간과 공간 규모의 물 수지의 닫힘을 확인하는 데에 중요한 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 광릉 산림 소유역에서 지하수의 역할을 규명하기 위해 설치될 지하수 관정의 정확한 깊이와 위치를

파악하고자 실시한 ER 현지 조사의 예비 결과를 제시하였다. 앞으로의 연구는 유용성이 입증된 전기비저항 탐사와 더불어 GPR 탐사, 전자탐사, 탄성과 탐사 등의 복합 물리탐사와 GIS를 이용한 분석을 통해 더 정확한 지하구조의 정보와 지하수공 최적의 위치를 추정할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

측정 및 분석에 도움을 주신 농업기반공사 이기철 부장님, 이주영 계장님, 이병선 연구원과 한국지질자원연구원 박삼규 박사님, 연세대 현승규, 박원우 군에게 감사드립니다. 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비 지원(과제번호 1-8-2)에 의해 수행되었다.

인용문헌

- Berthold, S., L. R. Bentley, and M. Hayashi, 2004: Integrated hydrogeological and geophysical study of depression-focused groundwater recharge in the Canadian prairies, *Water Resource Research* **40**, W06505, doi:10.1029/2003WR002982.
- Chand, R., S. Chandra, V. A. Rao, V. S. Singh, and S. C. Jain, 2004: Estimation of natural recharge and its dependency on sub-surface geoelectric parameters, *Journal of Hydrology* **299**, 67-83.
- Chung, S., J. Kim, I. Cho, and J. Jeon, 1992: Fracture mapping and deep-seated ground water exploration in the crystalline rocks by integrated geophysical techniques(in Korean with English abstract), *The Journal of Engineering Geology* **2**(2), 113-130.
- Chung, H. and H. Chung, 1999: Negative resistivity in geoelectric survey with dipole-dipole array, *Proceedings of Spring Joint Symposium of KSEEG, KSEG and KIME*, 59-62.
- Cook, P. G., G. R. Walker, G. Buselli, I. Potts, and A. R. Dodds, 1992: The application of electromagnetic techniques to groundwater recharge investigations, *Journal of Hydrology* **130**, 201-229.
- Garambois, S., P. S n chal, and H. Perroud, 2002: On the use of combined geophysical methods to assess water content and water conductivity of near-surface formations, *Journal of Hydrology* **259**, 32-48.
- Giao, P. H., S. G. Chung, D. Y. Kim, and H. Tanaka, 2003: Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation on Pusan clay deposits, *Journal of Applied Geophysics* **52**, 157-175.
- Hee Song Geotek Co., 2004: *User's Manual for DIPRO for*

- Windows V4.0, (Inc.) Hee Song Geotek Co.
- Jackson, P. D., K. J. Northmore, P. I. Meldrum, D. A. Gunn, J. R. Hallam, J. Wambura, B. Wangusi, and G. Ogutu, 2002: Non-invasive moisture monitoring within an earth embankment - a precursor to failure, *NDT&E international* **35**, 107-115.
- Kim, H. 1997: Detection of groundwater table changes in alluvium using electrical resistivity monitoring method(in Korean with English abstract), *The Journal of Engineering Geology* **7**(2), 139-151.
- Kim, G., J. Lee, and T. Chang, 1999: Dipole-dipole array geoelectric survey for fracture zone detection(in Korean with English abstract), *Journal of the Korean Geophysical Society* **2**(3), 217-224.
- KNA, 2004: <http://www.koreaplants.go.kr:9300>
- KSEG, 2002: *Practical guide for geophysical exploration for application to civil and environmental field*, OB-Press, 311pp.
- Lunt, I. A., S. S. Hubbard, and Y. Rubin, 2004: Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data, *Journal of Hydrology*, in press.
- Park, C., 1996: Estimation of the available amount of groundwater in South Korea: 1. development of the method, *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment* **3**(1), 15-20.
- Park, S., 2004: Physical property factors controlling the electrical resistivity of subsurface(in Korean with English abstract), *Korean Society of Exploration Geophysicists* **7**(2), 130-135.
- Park, S. G., S. Asano, S. Matsuura, T. Okamoto, and J. H. Kim, 2004: Groundwater investigation by electrical resistivity prospecting in landslide area, *Proceedings of the 7th SEGJ International Symposium*, 447-452.
- Park, S. G., S. Asano, S. Matsuura, T. Okamoto, and J. H. Kim, 2005: Geoelectrical laboratory and field studies of groundwater occurrence in a landslide area: case study from Japan, *Exploration Geophysics*, in press.
- Pool, D. R., and J. H. Eychaner, 1995: Measurements of aquifer-storage change and specific yield using gravity surveys, *Ground Water* **33**(3), 425-432.
- Porsani, J. L., V. R. Elis, and F. Y. Hiodo, 2004: Geophysical investigations for the characterization of fractured rock aquifers in Itu, SE Brazil, *Journal of Applied Geophysics* **57**(2), 119-128.
- Sohn, H., J. Kim, Y. Song, W. Yoon, I. Kim, M. Suh, K. Kim and J. Cho, 1999: *Geophysical exploration for geotechnical environment*, Sigma-Press, 716p.
- Song, S., H. Chung and B. Kwon, 2000: An interpretation of hydrogeologic structure using geophysical data from Chungwon area, Chungcheongbuk-Do(in Korean with English abstract), *Economic and Environmental Geology* **33**(4), 283-293.
- Suh, B., Y. Kim, C. Han, and S. Shin, 2000: Combination of investigation method for groundwater development around Shinbuk area in Kangwon-Do(in Korean with English abstract), *The Journal of Engineering Geology* **10**(1), 39-50.
- Ward, S. H., 1990: Resistivity and induced polarization methods in Ward, S. H., ed., *Geotechnical and environmental geophysics* **1**(5), 147-189.